

Zur Berechnung der so genannten „Optik-Shift-Wirkung“ hinsichtlich des theoretischen Akkommodationserfolges bei intraokularen Linsenimplantaten

K. A. Müller

Belegarzt am Kreiskrankenhaus Alsfeld

Zusammenfassung: Aufbauend auf der Gullstrand'schen Optik wird zunächst ein möglicher Rechenweg hinsichtlich des theoretisch zu erwartenden Akkommodationserfolges bei axialer Verschiebung intraokularer Linsenimplantate beschrieben. Durch Zusammenführung der beiden hierbei verwendeten Formeln wird sodann ein eigenes Rechenprogramm zur einfachen Ermittlung des jeweiligen akkommodativen Wirkungsgrades in Abhängigkeit von Hornhautbrechkraft, IOL-Brechkraft sowie Ausmaß und Ausgangspunkt der Optikverschiebung vorgestellt. Hierbei zeigt sich, dass der jeweilige Akkommodationsgewinn, bei gleicher Verschiebungsstrecke, ganz unterschiedlich ausfällt und somit nicht von einer festen Shift/Wirkbeziehung ausgegangen werden kann, wie vielfach immer noch behauptet wird. So können beispielsweise, in Abhängigkeit obiger Parameter, bei einem axialen Shift der optischen Linse um 1 mm, Brechkraftzuwächse bzw. Veränderungen zwischen weniger als 0,8 und mehr als 3,0 Dioptrien resultieren. Abschließend werden einige Überlegungen aufgezeigt, welche eine auf dem Optik-Shift-Prinzip basierende suffiziente pseudophake Akkommodation auch beim menschlichen Auge als eine durchaus im Bereich des Realisierbaren liegende erscheinen lassen.

I.

Ausgehend vom schematischen Auge nach Gullstrand sowie aufbauend auf den Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Optik soll im Folgenden der theoretisch zu erwartende Akkommodationserfolg bei axialer Verschiebung intraokularer Kunstlinsen („Optik-Shift-Prinzip“) im menschlichen Auge dargestellt werden.

Im Gegensatz zu den sonst gebräuchlichen diesbezüglichen Rechenvorschriften, ist anstelle der üblicherweise angegebenen Vorderkammertiefe der Abstand d zur Lagebestimmung der Kunstlinse im Auge berücksichtigt, der nicht bloß den rein mechanischen Abstand zwischen Hornhaut und Intraokularlinse, sondern den für die Berechnungen korrekteren optischen Abstand (da bezogen auf die jeweilige Lage der dingseitigen Hauptebene der Linse) repräsentiert.¹

Des Weiteren wird auf den Parameter der Bulbuslänge verzichtet, welcher jedoch in D indirekt enthalten ist (vorausgesetzt man geht von einer primär emmetropisierenden Gesamtbrechkraft aus).

a)

Analog dem natürlichen phaken menschlichen Auge setzt sich die Gesamtbrechkraft D eines pseudophaken Auges aus dem Brechwert D_1 der Hornhaut und dem Brechwert D_2 der Linse zusammen. (Abb.1)

Gemäß der Gullstrand'schen Formel für zusammengesetzte optische Systeme in beliebigen Medien gilt:

$$D = D_1 + D_2 - d \cdot D_1 \cdot D_2/n$$

Hierbei spielt der Abstand d zwischen Hornhaut und Linse eine ganz entscheidende Rolle, und zwar dergestalt, dass mit Verringerung von d , bei Vorliegen zweier Einzelsysteme mit sammelnder optischer Wirkung, die Gesamtbrechkraft des Systems zunimmt und umgekehrt.

¹ Der Abstand d fällt in der Regel geringfügig größer aus als die jeweilige Vorderkammertiefe, da hierbei, je nach Abstand der dingseitigen Linsenhauptebene vom dingseitigen Scheitelpunkt der Linse, ein zusätzlicher Streckenabschnitt (abhängig von der Mittendicke und den Krümmungsradien der Linse) hinzukommt. Bei diesem zusätzlichen Streckenabschnitt handelt es sich somit um eine von der jeweiligen Linse abhängige Fertigungskonstante.

Der Abstand d wird von der bildseitigen Hauptebene der Hornhaut H' bis zur dingseitigen Hauptebene der Intraokularlinse H gemessen. Somit wirkt sich jede axiale Verschiebung bzw. Abstandsänderung zwischen Hornhaut und Linse unmittelbar auf die Gesamtbrechkraft des Augensystems aus.

b)

Mindestens ebenso bedeutsam für den letztendlichen Akkommodationserfolg ist jedoch die mit jedem „Optik-Shift“ zugleich verbundene axiale Verschiebung der bildseitigen Hauptebene H' des Gesamtsystems (Hornhaut + IOL). Von hieraus bemisst sich nämlich die bildseitige Gesamtbrennweite des Auges, d.h. die Lage des bildseitigen Brennpunktes relativ zur Netzhaut.

Im Unterschied zu der unter a) berechneten Brechkraftänderung resultiert hierbei die Brennpunktverlagerung nicht aus einer Veränderung der bildseitigen Gesamtbrennweite des Auges, sondern allein aus der axialen Versetzung der Brennweite. In beiden Fällen kommt es zu einer realen Verschiebung des Brennpunktes („Fokus-Shift“) relativ zur Netzhaut, was somit Ausdruck einer echten Akkommodationsleistung ist.

Die Lage der bildseitigen Hauptebene H' des Augensystems verändert sich mit jeder axialen Verschiebung der Intraokularlinse und berechnet sich über

$$h' = -d \cdot D1/D$$

Gemessen wird h' von der bildseitigen Hauptebene der optischen Linse entgegen der optischen Lichtrichtung. Je nach Stärke der Intraokularlinse bzw. ihres relativen Anteils an der Gesamtbrechkraft kommt es mit axialer Verschiebung der Intraokularlinse zu einer gleichzeitigen anteiligen Verlagerung der bildseitigen Hauptebene H' des Augensystems und damit zu einer Fokusänderung relativ zur Netzhaut (ohne eigentliche Brechkraftänderung!).

Zur vollständigen Berechnung des Akkommodationsgewinns müssen die unter a) und b) ermittelten Teilerfolge zusammenaddiert werden.

Dies soll am Beispiel einer um 1mm nach anterior verschobenen emmetropisierenden Intraokularlinse von 21 dpt ($d = 4$ mm) im menschlichen Auge mit einer Hornhautbrechkraft von 44.0 dpt (Gesamtbrechkraft 62,23 dpt) verdeutlicht werden.

a) Wegen des hierbei lediglich interessierenden Betrages der durch die Änderung von \mathbf{d} (Δd) verursachten Brechkraftveränderung ΔD , ist auch nur der hierfür verantwortliche zweite Teil der Gullstrand'schen Formel von Bedeutung, nämlich:

$$- \Delta D = \frac{\Delta d \cdot D1 \cdot D}{n}$$

$$- \Delta D = \frac{0,001 \cdot 44,0 \cdot 21,0}{1,336} \cdot \frac{1}{m}$$

$$- \Delta D = 0,69 \text{ dpt}$$

=====

Danach führt eine Verringerung von \mathbf{d} (anteriore Verschiebung der Kunstlinse) um 1 mm zu einer Gesamtbrechkraftzunahme des Auges von **0,69 dpt**.

b) Zur Berechnung der Verlagerung der Systemhauptebene H' muß zunächst der unter a) ermittelte Brechkraftzuwachs berücksichtigt werden:

$$D = 62,23 + 0,69 = 62,92 \text{ dpt}$$

Sodann interessiert die durch Veränderung von \mathbf{d} (Δd) verursachte Auswirkung auf die Lageveränderung der bildseitigen Systemhauptebene $\Delta h'$:

$$\Delta h' = h'(\text{nachher}) - h'(\text{vorher})$$

$$\begin{aligned} h'(\text{vorher}) &= - \frac{0,004 \cdot 44,0}{62,23} \cdot \frac{1}{m} \\ &= - 2,83 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h'(\text{nachher}) &= - \frac{0,003 \cdot 44,0}{62,92} \cdot \frac{1}{m} \\ &= - 2,10 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\Delta h' = - 2,10 \text{ mm} - (- 2,83 \text{ mm}) = 0,73 \text{ mm}$$

Danach verschiebt sich mitläufig mit jeder Veränderung von **d** (um 1 mm) die Lage der Systemhauptebene H' (abzüglich der Teilstrecke von 0.73 mm), was konkret bei einer Verschiebung der Intraokularlinse (21dpt) um 1 mm nach anterior zu einer gleichfalls anterioren Verlagerung von H' um 0,27 mm bzw. zu einer um den gleichen Betrag bedingten bildseitigen Fokusverlagerung vor die Netzhaut des Auges führt.

Nach $f' = \frac{n}{D}$

$$f' = \frac{1,336}{62,23 \cdot \frac{1}{m}}$$

$$= 0,021468 \text{ m}$$

$$0,021468 \text{ m} - 0,00027 \text{ m} = 0,021198 \text{ m}$$

sowie $D = \frac{n}{f'}$

$$= \frac{1,336}{0,021198 \text{ m}}$$

$$= 63,02 \text{ dpt}$$

=====

entspricht dies einer zusätzlichen Myopisierung von $63,02 \text{ dpt} - 62,23 \text{ dpt} = \mathbf{0,79 \text{ dpt}}$ gegenüber der Ausgangssituation.

Addiert man nun die Teilbeträge a) = 0,69 dpt und b) = 0,79 dpt zusammen, so resultiert ein Akkommodationserfolg von insgesamt $\mathbf{1,48 \text{ dpt}}$.

=====

II.

Durch Zusammenführung der beiden unter I. a) und b) gezeigten getrennten Rechenwege in eine einzige Rechenvorschrift, entsteht die neue Beziehung:

$$\mathbf{a} = (n/D(\text{nachher}) - n/D(\text{vorher})) + (\Delta d + \Delta h')$$

wobei:

- a = axiale Verschiebung des Fokus relativ zur Netzhaut (Fokus-Shift)
- n = Brechungsindex 1.336 (Kammerwasser)
- D_n = Gesamtbrechkraft nach der Optikverschiebung
- D_v = Gesamtbrechkraft vor der Optikverschiebung
- Δ d = Maß der Optikverschiebung bzw. Vorderkammertiefenänderung (Optik-Shift)
- Δ h' = Differenz der Messstrecken zur Bestimmung der Lage von H' zwischen vor und nach dem Optik-Shift

Durch eine anschließende in Verhältnissetzung der gewonnenen Fokus-Shift-Strecke **a** zur ursprünglichen (vor dem Optik-Shift) bildseitigen Brennweite f' (für Emmetropie), lässt sich sodann der tatsächliche Akkommodationsgewinn (in Dioptrien) gegenüber der Ausgangssituation ermitteln:

$$\mathbf{Akkommodationsgewinn} \text{ (dpt)} = n/(f' + a) - n/f'$$

Der jeweilige „**akkommodative Wirkungsgrad**“ ergibt sich aus dem Verhältnis Fokus-Shift zu Optik-Shift ($a/\Delta d$) in Prozent (%).

Ergebnisse:

Durch gezielte Veränderung der Parameter D1, D2 sowie d, können hierbei folgende Zusammenhänge aufgezeigt werden:

1. der akkommodative Wirkungsgrad bzw. Akkommodationserfolg korreliert positiv mit:
 - a) dem Ausmaß der Optikverschiebung (Optik-Shift) (Abb.2)
 - b) dem Ausgangspunkt der Optikverschiebung (Abb.3)
 - c) der absoluten Brechkraft der Intraokularlinse (Abb.4)
 - d) der relativen Brechkraft der Intraokularlinse zur Hornhautbrechkraft (Abb.5)
 - e) der Gesamtbrechkraft des Auges (Abb.6)

2. der akkommodative Wirkungsgrad bzw. Akkommodationserfolg korreliert negativ mit:
 - a) dem Abstand d zwischen Hornhaut und Linse
 - b) der Bulbuslänge bzw. der für Emmetropie erforderlichen bildseitigen Brennweite f^{vorher}

3. Während der mit dem Optik-Shift verbundene Anteil der Brechkraftänderung am Akkommodationszuwachs einer streng linearen Beziehung folgt, zeigt der über die Hauptebenenverschiebung bedingte Anteil einen mit Abnahme von d ansteigenden Kurvenverlauf.

4. Je kürzer der optische Abstand zwischen Hornhaut und Linse (bzw. je kleiner die Vorderkammertiefe), desto mehr gewinnt der Anteil der Systemhauptebenenverschiebung ($\Delta H^{\text{'s}}$) gegenüber dem Anteil des tatsächlichen Brechkraftzuwachses (ΔD) am Gesamterfolg der Akkommodation an Bedeutung.

Dies zeigt deutlich, dass es keine allein vom Ausmaß des Optik-Shift abhängige festgeschriebene akkommodative Wirkbeziehung gibt.²

III.

Schlussfolgerung und Ausblick:

Durch gezielte Veränderung einer oder mehrerer der drei Parameter (D_1 , D_2 , d) ließe sich somit der akkommodative Wirkungsgrad bzw. der zu erwartende Akkommodationsgewinn beim Optik-Shift erheblich verbessern.

² NawaY, Ueda T, Nakatsuka M, et al. Accommodation obtained per 1.0 mm forward movement of a posterior chamber intraocular lens. J Cataract Refract Surg 2003; 29:2069-2072.

Im Falle von D1 und/oder D2 wäre dies beispielsweise über eine bewusste Erhöhung der Linsenbrechkraft (D2) bei gleichzeitiger bzw. anschließender kompensatorischer Abschwächung der Hornhautbrechkraft (D1) - zum Erhalt der emmetropisierenden Gesamtbrechkraft - mittels einer Kontaktlinse oder besser noch durch einen laserchirurgischen Eingriff (PRK, LASIK etc.) der Hornhaut denkbar. (Vielleicht liegt hier sogar die Zukunft für eine wirkungsvolle allgemeine Presbyopiebehandlung.)

Ein ähnlicher Effekt zur Verbesserung des akkommodativen Wirkungsgrades bestünde in der gezielten Erhöhung der IOL-Brechkraft mit gleichzeitiger kompensatorischer Abschwächung der Gesamtbrechkraft durch Implantation einer weiteren optischen Linse mit einer zerstreuernden Wirkung hinter die vordere optisch sammelnde Linse („Duale Optik“), was allerdings an einen, zumindest partiell gegenläufigen Shift der beiden Linsenoptiken gebunden ist.³

Durch eine, abhängig von der Ausgangs- bzw. Ruhelage des Linsenimplantats, Aufteilung der Verschiebungsstrecke in einen anterioren und einen posterioren Anteil, wäre zudem (trotz des nur begrenzten Platzangebots im Auge) eine Ausweitung der gesamten Verschiebungsstrecke erreichbar.

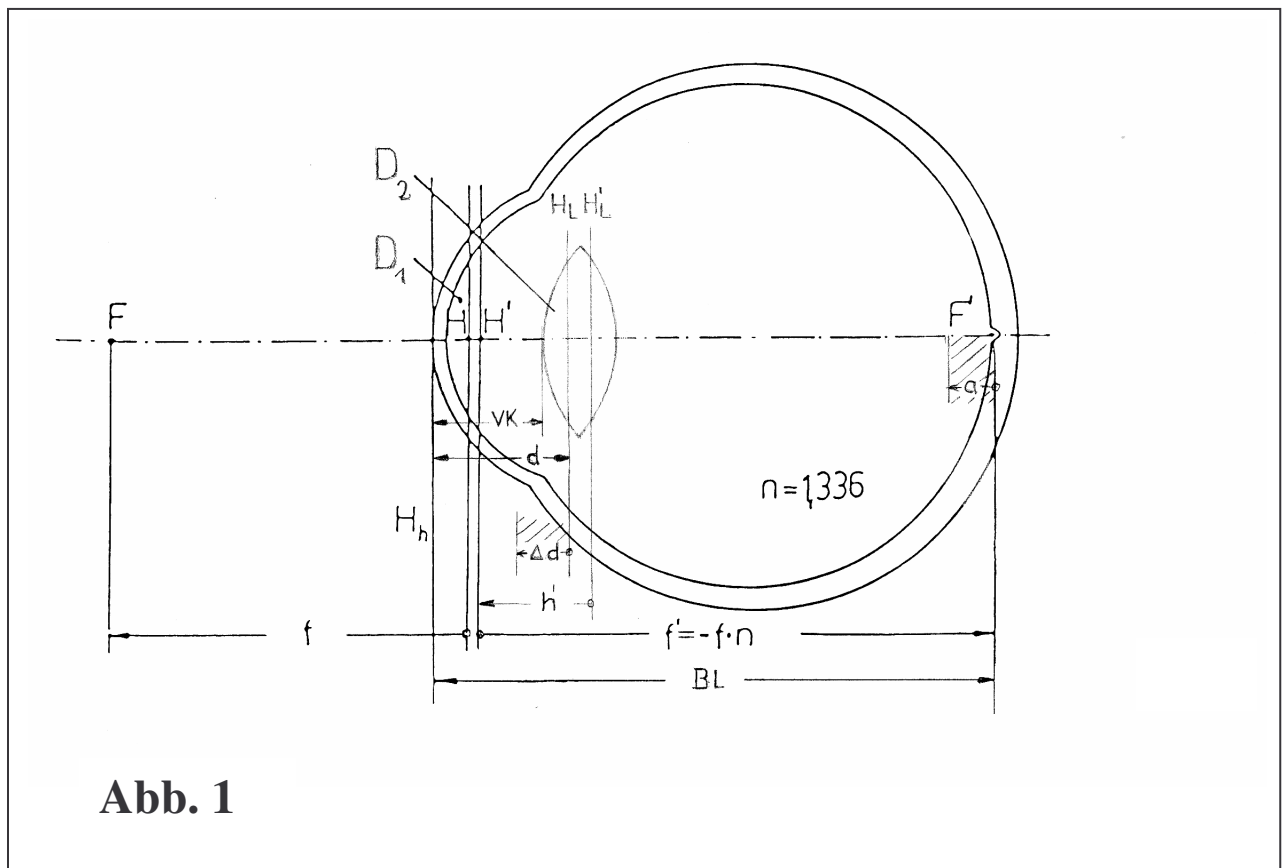
Dies alles zeigt, dass eine auf dem Optik-Shift-Prinzip basierende hinreichende Akkommodationsleistung mit weitaus weniger an Verschiebungsstrecke auskommen vermag, als gemeinhin immer wieder behauptet wird.⁴

Berücksichtigt man zu dem noch all jene Faktoren der so genannten „Pseudoakkommodation“⁵, so dürfte eine auf dem Optik-Shift-Prinzip basierende suffiziente pseudophake Akkommodation - zumindest theoretisch - auch im menschlichen Auge durchaus im Bereich des Realisierbaren liegen.

³ Berechnungen hierzu ergeben, dass bei einer solchen „dualen Optik“ mit exakt symmetrisch-gegenläufiger Aufteilung der Verschiebungsstrecke der beiden Linsen, je nach Ausmaß der vorgegebenen Brechkraftaufteilung zwischen vorderer Optik (mit positiver Brechkraft) und hinterer Optik (mit negativer Brechkraft), ein fest definierter zusätzlicher Akkommodationsgewinn gegenüber Einzeloptiksystemen gleicher Brechkraftstärke und Shiftstrecke resultiert.

⁴ Die in diesem Zusammenhang immer wieder behaupteten angeblich benötigten „2.2 mm“ verwundern um so mehr, als diese „Erkenntnis“ einem Fachaufsatz von J.T. HOLLADAY (Am J Ophthalmol 1993; 116: 63 – 66) entspringen soll, in dem es tatsächlich jedoch lediglich heißt: „...A 1-mm error in the axial location of a posterior chamber lens results in approximately a 1.90-diopter error in the spectacle plane.“ Hiernach lässt sich aber allenfalls (für die Erreichung einer + 2.9 dpt. starken Nahwirkung und ohne nähere Angabe der besagten Parameter) eine benötigte Verschiebungsstrecke von 1,52 mm herleiten.

⁵ Die „Pseudoakkommodation“ setzt sich bekanntermaßen aus mehreren, ganz unterschiedlichen Faktoren zusammen (reaktive Miosis, positives Refraktionsdefizit, Astigmatismus myopicus, retinale Auflösung, Leuchtdichte etc.), welche sich in ihrer Wirkung mehr oder weniger aufsummieren und der tatsächlichen Akkommodation noch hinzu gerechnet werden müssen. (Je besser die Optik-Shift-Wirkung, desto weniger ist man auf die Pseudowirkung angewiesen!)



- D1 = Hht Brechkraft
- D2 = IOL Brechkraft
- D = Gesamtbrechkraft
- Δd = Optik-Shift
- a** = **Focus-Shift**

D1	44,00
D2	21,00
D	62,23
n	1,3360

Δd [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [mm]	D [Dpt]	ΔDpt	h' [mm]	$\Delta h'$ [mm]	$\Delta H's$ [mm]	a [mm]	Wirk. [%]	Dioptriengewinn
-1,0	21,23	-0,24	62,93	0,69	-2,10	0,73	-0,27	-0,51	50,6%	1,50
-0,9	21,25	-0,21	62,86	0,62	-2,17	0,66	-0,24	-0,45	50,5%	1,35
-0,8	21,28	-0,19	62,79	0,55	-2,24	0,59	-0,21	-0,40	50,5%	1,19
-0,7	21,30	-0,17	62,72	0,48	-2,32	0,51	-0,19	-0,35	50,4%	1,04
-0,6	21,33	-0,14	62,65	0,41	-2,39	0,44	-0,16	-0,30	50,3%	0,89
-0,5	21,35	-0,12	62,58	0,35	-2,46	0,37	-0,13	-0,25	50,3%	0,74
-0,4	21,37	-0,10	62,51	0,28	-2,53	0,29	-0,11	-0,20	50,2%	0,59
-0,3	21,40	-0,07	62,44	0,21	-2,61	0,22	-0,08	-0,15	50,2%	0,44
-0,2	21,42	-0,05	62,37	0,14	-2,68	0,15	-0,05	-0,10	50,1%	0,29
-0,1	21,44	-0,02	62,30	0,07	-2,75	0,07	-0,03	-0,05	50,1%	0,15
0,0	21,47	0,00	62,23	0,00	-2,83	0,00	0,00	0,00	-	0,00
0,1	21,49	0,02	62,16	-0,07	-2,90	-0,07	0,03	0,05	50,0%	-0,14
0,2	21,52	0,05	62,10	-0,14	-2,98	-0,15	0,05	0,10	49,9%	-0,29
0,3	21,54	0,07	62,03	-0,21	-3,05	-0,22	0,08	0,15	49,8%	-0,43
0,4	21,56	0,10	61,96	-0,28	-3,12	-0,30	0,10	0,20	49,8%	-0,57
0,5	21,59	0,12	61,89	-0,35	-3,20	-0,37	0,13	0,25	49,7%	-0,71

d [mm]	f' [mm]	h' [mm]
4,00	21,47	-2,83

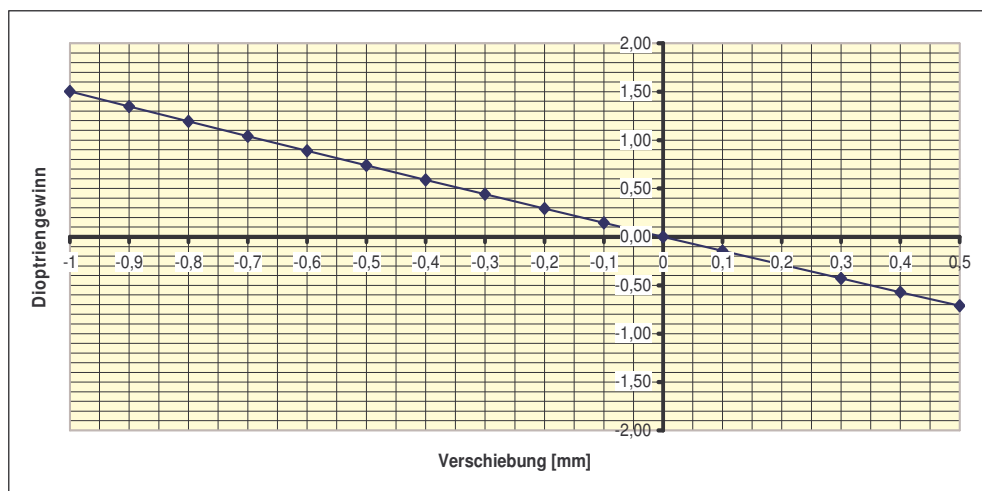


Abb. 2

D1	44,00
D2	21,00
D	63,62
n	1,3360

Δd [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [mm]	D [Dpt]	ΔDpt	h' [mm]	$\Delta h'$ [mm]	$\Delta H's$ [mm]	a [mm]	Wirk. [%]	Dioptriengewinn
-1,0	20,77	-0,23	64,31	0,69	-0,68	0,70	-0,30	-0,53	52,7%	1,64
-0,9	20,80	-0,20	64,24	0,62	-0,75	0,63	-0,27	-0,47	52,6%	1,47
-0,8	20,82	-0,18	64,17	0,55	-0,82	0,56	-0,24	-0,42	52,6%	1,30
-0,7	20,84	-0,16	64,10	0,48	-0,89	0,49	-0,21	-0,37	52,5%	1,13
-0,6	20,86	-0,14	64,03	0,41	-0,96	0,42	-0,18	-0,31	52,5%	0,97
-0,5	20,89	-0,11	63,96	0,35	-1,03	0,35	-0,15	-0,26	52,4%	0,80
-0,4	20,91	-0,09	63,89	0,28	-1,10	0,28	-0,12	-0,21	52,4%	0,64
-0,3	20,93	-0,07	63,82	0,21	-1,17	0,21	-0,09	-0,16	52,3%	0,48
-0,2	20,96	-0,05	63,76	0,14	-1,24	0,14	-0,06	-0,10	52,3%	0,32
-0,1	20,98	-0,02	63,69	0,07	-1,31	0,07	-0,03	-0,05	52,2%	0,16
0,0	21,00	0,00	63,62	0,00	-1,38	0,00	0,00	0,00	-	0,00
0,1	21,02	0,02	63,55	-0,07	-1,45	-0,07	0,03	0,05	52,1%	-0,16
0,2	21,05	0,05	63,48	-0,14	-1,52	-0,14	0,06	0,10	52,1%	-0,31
0,3	21,07	0,07	63,41	-0,21	-1,60	-0,21	0,09	0,16	52,0%	-0,47
0,4	21,09	0,09	63,34	-0,28	-1,67	-0,28	0,12	0,21	52,0%	-0,62
0,5	21,12	0,11	63,27	-0,35	-1,74	-0,36	0,14	0,26	51,9%	-0,78

d [mm]	f' [mm]	h' [mm]
2,00	21,00	-1,38

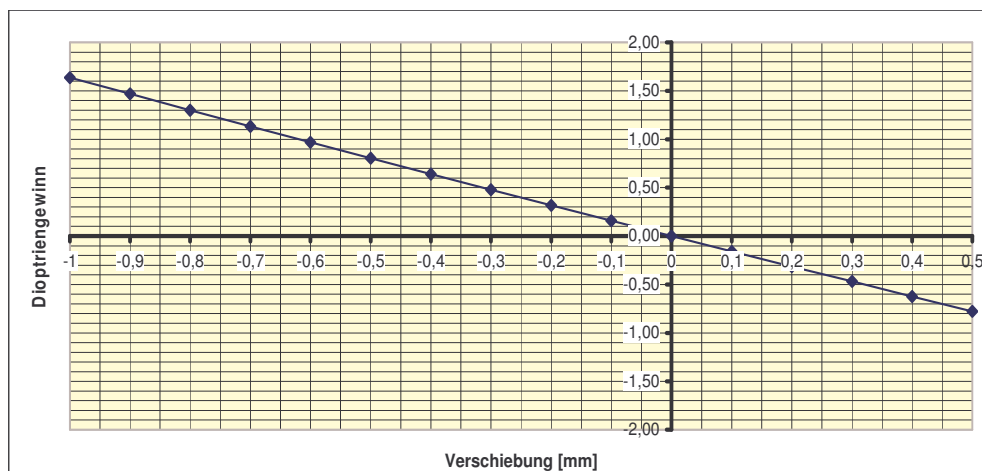


Abb. 3

D1	44,00
D2	31,00
D	70,92
n	1,3360

Δd [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [mm]	D [Dpt]	ΔDpt	h' [mm]	$\Delta h'$ [mm]	$\Delta H's$ [mm]	a [mm]	Wirk. [%]	Dioptriengewinn
-1,0	18,57	-0,27	71,94	1,02	-1,83	0,65	-0,35	-0,62	62,1%	2,42
-0,9	18,60	-0,24	71,84	0,92	-1,90	0,58	-0,32	-0,56	62,0%	2,16
-0,8	18,62	-0,21	71,73	0,82	-1,96	0,52	-0,28	-0,50	61,9%	1,92
-0,7	18,65	-0,19	71,63	0,71	-2,03	0,45	-0,25	-0,43	61,9%	1,67
-0,6	18,68	-0,16	71,53	0,61	-2,09	0,39	-0,21	-0,37	61,8%	1,42
-0,5	18,70	-0,13	71,43	0,51	-2,16	0,33	-0,17	-0,31	61,8%	1,18
-0,4	18,73	-0,11	71,32	0,41	-2,22	0,26	-0,14	-0,25	61,7%	0,94
-0,3	18,76	-0,08	71,22	0,31	-2,29	0,20	-0,10	-0,19	61,7%	0,70
-0,2	18,79	-0,05	71,12	0,20	-2,35	0,13	-0,07	-0,12	61,6%	0,47
-0,1	18,81	-0,03	71,02	0,10	-2,42	0,07	-0,03	-0,06	61,6%	0,23
0,0	18,84	0,00	70,92	0,00	-2,48	0,00	0,00	0,00	-	0,00
0,1	18,87	0,03	70,81	-0,10	-2,55	-0,07	0,03	0,06	61,4%	-0,23
0,2	18,89	0,05	70,71	-0,20	-2,61	-0,13	0,07	0,12	61,4%	-0,46
0,3	18,92	0,08	70,61	-0,31	-2,68	-0,20	0,10	0,18	61,3%	-0,69
0,4	18,95	0,11	70,51	-0,41	-2,75	-0,26	0,14	0,25	61,3%	-0,91
0,5	18,98	0,14	70,41	-0,51	-2,81	-0,33	0,17	0,31	61,2%	-1,13

d [mm]	f' [mm]	h' [mm]
4,00	18,84	-2,48

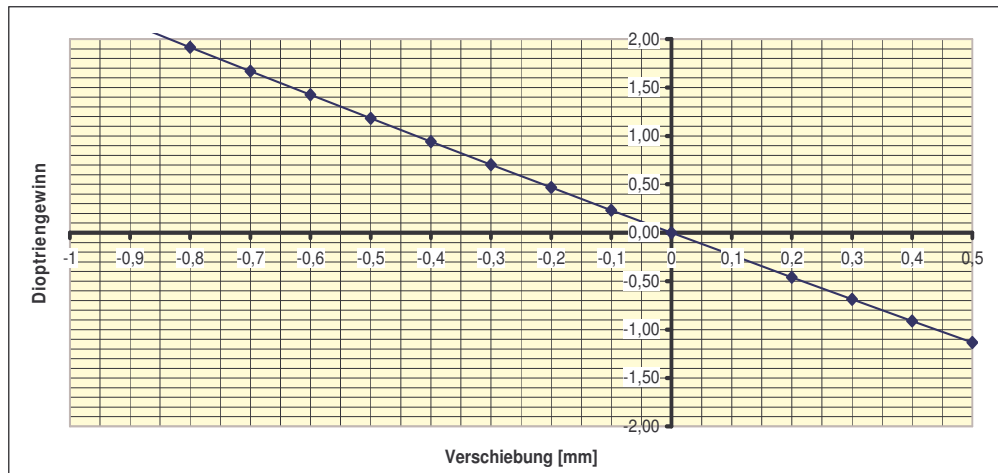


Abb. 4

D1	35,00
D2	35,00
D	66,33
n	1,3360

Δd [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [mm]	D [Dpt]	ΔDpt	h' [mm]	$\Delta h'$ [mm]	$\Delta H's$ [mm]	a [mm]	Wirk. [%]	Dioptriengewinn
-1,0	19,87	-0,27	67,25	0,92	-1,56	0,55	-0,45	-0,73	72,5%	2,48
-0,9	19,89	-0,25	67,16	0,83	-1,62	0,49	-0,41	-0,65	72,5%	2,22
-0,8	19,92	-0,22	67,07	0,73	-1,67	0,44	-0,36	-0,58	72,5%	1,97
-0,7	19,95	-0,19	66,97	0,64	-1,72	0,39	-0,31	-0,51	72,4%	1,71
-0,6	19,98	-0,17	66,88	0,55	-1,78	0,33	-0,27	-0,43	72,4%	1,46
-0,5	20,00	-0,14	66,79	0,46	-1,83	0,28	-0,22	-0,36	72,4%	1,21
-0,4	20,03	-0,11	66,70	0,37	-1,89	0,22	-0,18	-0,29	72,3%	0,97
-0,3	20,06	-0,08	66,61	0,28	-1,94	0,17	-0,13	-0,22	72,3%	0,72
-0,2	20,09	-0,06	66,52	0,18	-2,00	0,11	-0,09	-0,14	72,2%	0,48
-0,1	20,11	-0,03	66,42	0,09	-2,05	0,06	-0,04	-0,07	72,2%	0,24
0,0	20,14	0,00	66,33	0,00	-2,11	0,00	0,00	0,00	-	0,00
0,1	20,17	0,03	66,24	-0,09	-2,17	-0,06	0,04	0,07	72,1%	-0,24
0,2	20,20	0,06	66,15	-0,18	-2,22	-0,11	0,09	0,14	72,1%	-0,47
0,3	20,22	0,08	66,06	-0,28	-2,28	-0,17	0,13	0,22	72,0%	-0,70
0,4	20,25	0,11	65,97	-0,37	-2,33	-0,22	0,18	0,29	72,0%	-0,94
0,5	20,28	0,14	65,87	-0,46	-2,39	-0,28	0,22	0,36	72,0%	-1,16

d [mm]	f' [mm]	h' [mm]
4,00	20,14	-2,11

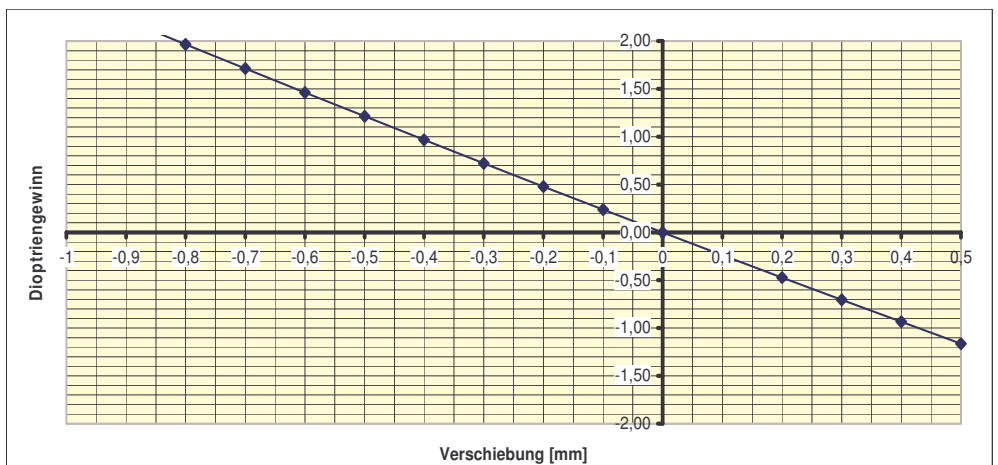


Abb. 5

D1	45,00
D2	35,00
D	76,46
n	1,3360

Δd [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [mm]	D [Dpt]	ΔDpt	h' [mm]	$\Delta h'$ [mm]	$\Delta H's$ [mm]	a [mm]	Wirk. [%]	Dioptriengewinn
-1,0	17,21	-0,27	77,64	1,18	-1,16	0,61	-0,39	-0,66	65,9%	3,00
-0,9	17,23	-0,24	77,52	1,06	-1,22	0,55	-0,35	-0,59	65,8%	2,68
-0,8	17,26	-0,21	77,41	0,94	-1,28	0,49	-0,31	-0,53	65,8%	2,37
-0,7	17,29	-0,19	77,29	0,83	-1,34	0,43	-0,27	-0,46	65,7%	2,07
-0,6	17,31	-0,16	77,17	0,71	-1,40	0,37	-0,23	-0,39	65,7%	1,76
-0,5	17,34	-0,13	77,05	0,59	-1,46	0,31	-0,19	-0,33	65,6%	1,46
-0,4	17,37	-0,11	76,93	0,47	-1,52	0,24	-0,16	-0,26	65,6%	1,17
-0,3	17,39	-0,08	76,82	0,35	-1,58	0,18	-0,12	-0,20	65,5%	0,87
-0,2	17,42	-0,05	76,70	0,24	-1,64	0,12	-0,08	-0,13	65,5%	0,58
-0,1	17,45	-0,03	76,58	0,12	-1,70	0,06	-0,04	-0,07	65,4%	0,29
0,0	17,47	0,00	76,46	0,00	-1,77	0,00	0,00	0,00	-	0,00
0,1	17,50	0,03	76,35	-0,12	-1,83	-0,06	0,04	0,07	65,3%	-0,28
0,2	17,53	0,05	76,23	-0,24	-1,89	-0,12	0,08	0,13	65,3%	-0,57
0,3	17,55	0,08	76,11	-0,35	-1,95	-0,19	0,11	0,20	65,2%	-0,85
0,4	17,58	0,11	75,99	-0,47	-2,01	-0,25	0,15	0,26	65,1%	-1,12
0,5	17,61	0,14	75,87	-0,59	-2,08	-0,31	0,19	0,33	65,1%	-1,40

d [mm]	f' [mm]	h' [mm]
3,00	17,47	-1,77

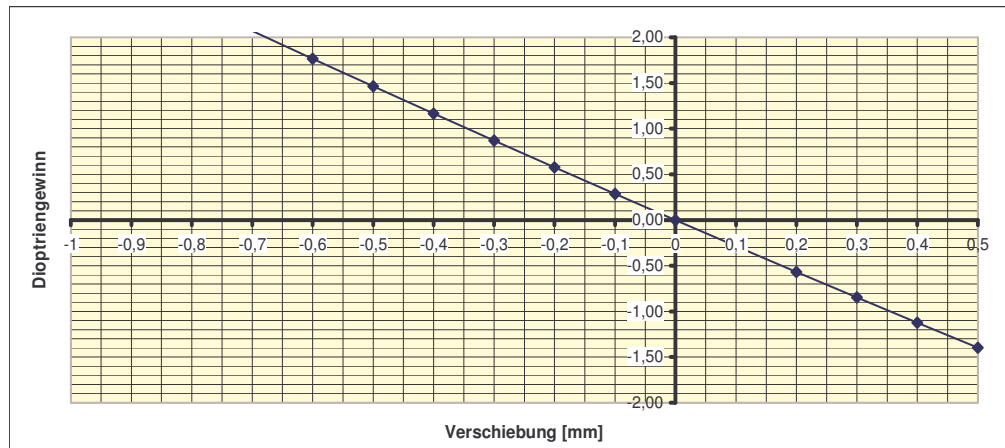


Abb. 6

Berechnungsgrundlagen:

a) $D = D1 + D2 - d \cdot D1 \cdot D2/n$

So genannte Gullstrand'sche Formel. Gibt die Gesamtbrechkraft abhängig vom Abstand (d) zwischen Hornhaut (D1) und Intraokularlinse (D2) an

b) $\Delta f' = n/D(\text{nachher}) - n/D(\text{vorher})$

Gibt das Ausmaß der über die Gesamtbrechkraftänderung (ΔD) bedingten bildseitigen Brennweitenänderung an

c) $h' = -d \cdot D1/D$

Gibt die Lage der bildseitigen Systemhauptebene (H's) abhängig von der Hornhautbrechkraft (D1) zur Gesamtbrechkraft (D) an

d) $\Delta d = d(\text{nachher}) - d(\text{vorher})$

Gibt das Ausmaß des Optik-Shift an

e) $\Delta h' = h'(\text{nachher}) - h'(\text{vorher})$

Gibt die Differenz der Messstrecken zur Bestimmung der Lage der bildseitigen Systemhauptebene (H's) zwischen vor und nach der Optikverschiebung an

f) $\Delta H's = \Delta d + \Delta h'$

Gibt das Ausmaß der bildseitigen Systemhauptebenenverlagerung (bzw. der Versetzung der bildseitigen Brennweite (f')) an

g) $a = \Delta f' + \Delta H's$
 $= (n/D(\text{nachher}) - n/D(\text{vorher})) + (\Delta d + \Delta h')$

Gibt das Ausmaß der realen Fokusverlagerung („Focus-Shift“) relativ zur Netzhaut an

h) „akkommodativer Wirkungsgrad“ = $a/\Delta d$

Gibt das Verhältnis „Focus-Shift“ zu „Optik-Shift“ in % an

i) **Akkommodationserfolg** = $n/(f'(\text{vorher}) + a) - n/f'(\text{vorher})$

Gibt den Zuwachs in Dioptrien gegenüber der Ausgangssituation an